

# 8 m電波望遠鏡の改修と 波長21cm電波輝線による銀河系の中性水素(HI)の観測

## Development of a Galaxy HI observation system for the 8m radio telescope at Misato Observatory

生涯学習教育研究センター：佐藤奈穂子

学生自主創造科学センター：○尾久土正己

教育学部：富田晃彦、石塚互

システム工学部：曾我真人

みさと天文台：矢動丸泰、豊増伸治、小澤友彦

甲南大学：佐藤文隆

M. OKYUDO, N. SATO, A. TOMITA, W. ISHIZUKA, M. SOGA, Y. YADOMARU,  
S. TOYOMASU, T. OZAWA, and H. SATO

○印研究代表者連絡先：[okyudo@center.wakayama-u.ac.jp](mailto:okyudo@center.wakayama-u.ac.jp)、電話073-457-8504

本研究に関連するホームページURL：<http://www.wakayama-u.ac.jp/~okyudo/NewEar/>

**要約：**8m 電波望遠鏡を改修し、銀河系からの中性水素(HI エイチワン)輝線を観測するシステムの立ち上げを行っている。この望遠鏡は、長野県の野辺山太陽電波観測所の「野辺山動スペクトル計」を和歌山県のみさと天文台へと移設したものである。現在、銀河系からのHI輝線によるファーストライトを済ませ、銀河面(天の川)に沿っての試験観測を行った。また、この8m 電波望遠鏡を用いた天文普及活動も行っている。本研究の期待される結果としては、(1)新しい電波天文学の教材の開発(2)一般市民を対象とした電波天文の普及活動(3)卒論・修論の素材としての利用、が挙げられる。

### 1. はじめに

現代生活においては、ラジオや電子レンジをはじめとした電波を利用した製品や、高性能電波通信技術を注ぎ込んだ携帯電話が広く普及しており、電波は生活に密着したものとなっている。また、現代天文学における電波天文学の重要性は非常に高まりつつある。HI電波輝線観測により銀河系の形が明らかになったのは1958年のことである(参考文献[1])のに代表されるように、電波天文学はまだ若い学問であるが、急激かつ大きな発展を見せており、パルサーや宇宙背景放射の発見などのノーベル賞は電波天文学から出ている。電波観測の重要性は世界的にも広く認められており、例えば南米チリに建設中の世界共同の巨大電波望

遠鏡であるALMAは、日米欧のそれぞれにおいて最優先に実現すべき地上観測装置計画と位置づけられている。

ところが現在、電波天文学はもとより電波一般に対しても、一般市民の理解は深いとはいえない。その一因として、理科教育において興味や理解を増進させるための重要な手段である実験・観察が、電波や電波天文に関してはとても少ないことが挙げられる。例えば学校の授業や公開天文台などでの宇宙の観察手段は可視光に偏っており、宇宙電波を扱っているところはあまり多くはない。あつたとしても、太陽電波や流星電波などに限られており、可視光での観察が遠方の天体まで及んでいるのに比べると、地球のごく近傍(流



図1：現在の8m 電波望遠鏡（みさと天文台にて。2007 年2 月撮影）

背後の建物には、口径1mの光学望遠鏡が収められている。



星は大気圏での現象)の観察にとどまっている。また、現代生活における電波や通信技術利用においても、それぞれの機器はブラックボックス化している。我々はこのような状況を打開するために、宇宙電波の観測を通して、宇宙や電波を身近なものに感じ、理解を深められるような機会を提供することを目指している。

HI 輝線は人類が初めて検出した宇宙電波輝線であり、銀河面に広く分布し、強度も十分であることから、電波天文学の入門には適している。しかし、日本の電波天文は、戦略的にこの周波数を避けてきた結果、日本国内には本格的にHI 観測を行う望遠鏡は存在しない。サイエンスの先端では、観測周波数の高周波化や、装置の大型化による高分解能化・高感度化が追求されており、HI輝線を観測することのできる望遠鏡としては、海外でVLAやGBTなどの大型装置が稼働している。現在建設中の電波望遠鏡ALMAのターゲットは数十GHzから数百GHzの周波数帯である。しかし、低周波低分

解能の小口径望遠鏡にも、教育や広報普及の面で果たすべき役割はまだ多い。

そこで、我々は8m 電波望遠鏡を改修して、銀河面のHIサーベイ観測を行い、得られたデータから銀河系の2次元地図の作成を行い、オールト(J. H. Oort)による研究の追体験が可能な教材の開発を行うこととした。(電波天文とオールトの研究の詳細については、添付Aを参照)また、この8m 望遠鏡の立ち上げノウハウを蓄積することにより、高校・公開天文台が購入できるような、安価な電波望遠鏡セットの開発を目指す。また、この望遠鏡は公開天文台に設置されているため、電波天文学の広報塔として利用できる。昼間の天体観測などの、電波天文学に触れる機会を提供できる。そして、国内唯一のHI 観測用望遠鏡として、大学生の卒業論文・修士論文の研究素材としても利用可能である。



図2：野辺山動スペクトル計（野辺山太陽電波観測所にて。1977－1994 年） 背景に見えるのは、同じ架台を持つ口径6mの太陽電波望遠鏡。



図3：みさと天文台へ移設後の8m 電波望遠鏡

現在の写真と比べ、パラボラの骨組みが粗で、お椀が浅いのが分かる。



## 2. 望遠鏡の改修

みさと天文台の8m電波望遠鏡(図1参照)はもともと、「野辺山動スペクトル計」と呼ばれ、1977 年から国立天文台野辺山太陽電波観測所で70～220MHz帯での太陽電波観測に用いられていたものである(参考文献[2]、図2参照)が、1994年の運用終了後そのまま放置されていたのを、1998 年にみさと天文台へ移設し、機械系のみ駆動可能な状態で保存されていたものである(図3参照)。みさと天文台では、この望遠鏡自体を日本の電波天文学の歴史を伝える展示物として来訪者に公開していた。

この、運用を終え静態保存されていた70～220MHz帯での太陽電波観測用望遠鏡を、1.4GHz での銀河面観測用に転用するために、老朽化対策、高周波化、駆動範囲の拡大などを中心とする以下のような改修工事を行った。

### 2.1 鏡面の更新

望遠鏡がパラボラを用いて電波を効率よく集める



図5：8m 望遠鏡の鏡面取り付けの様子(2006 年5 月撮影)  
新しいパラボラをクレーンで吊り上げ、望遠鏡架台へ載せた。

図4：  
新しい  
パラボラ面  
の組立

工場で  
組み立てた  
部品を  
現地で組立

さらに繋げ、  
ネジで留め  
てゆく

骨組みの  
完成

鏡面は金属  
の網を張る

足の踏み場  
を考えて、  
外側から張  
ってゆく。

パラボラか  
ら飛び出た  
網の端を  
きれいに  
カットして  
完成

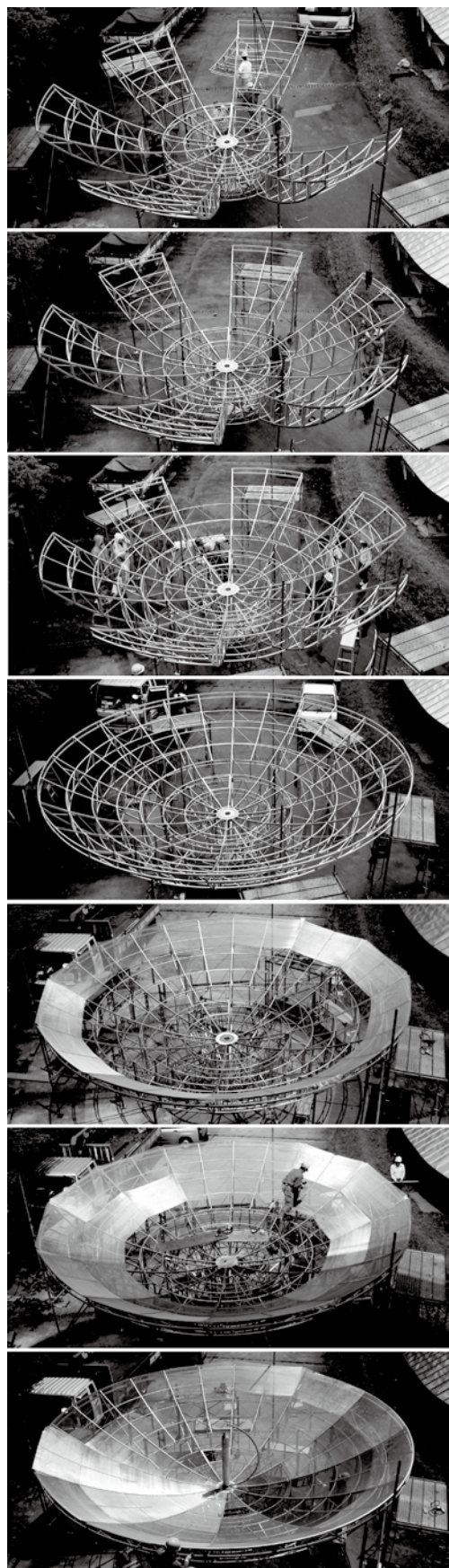






図6：板材や鉄骨による補強工事の前(左)と後(右)。

ためには、観測波長の $1/20$ 以下の鏡面精度が必要であるが、野辺山動スペクトル計はもともとメガヘルツ帯(70~220MHz)の電波を受信するための望遠鏡であったため、1.4GHzのHI輝線を効率良く集めるためには鏡面精度の改善が必要となる。一般的には鏡面のみを交換する可能性もあったが、移設工事の影響による鉄骨のゆがみも見受けられたため、既存のパラボラ面を取り外して新しい鏡面精度1cm程度の直径8mのパラボラに交換した(図4・図5参照)。工事は西村製作所に依頼した。一般に、望遠鏡の空間分解能は、その口径と受信波長から計算できる。口径が大きいほど高い空間分解能を持ち、天体を詳細に観測できる事になる。この望遠鏡は、直径8mで波長21cmの電波を受信することから、空間分解能は約1.8度と見積もられる。

## 2.2 架台の改修

この望遠鏡は製造から30年近く経っており、その間、標高1300mの野辺山高原に設置されており、過酷な自然環境にさらされてきたため、老朽化が激しい箇所が見受けられる。また、今回の鏡面更新の工事により、パラボラ部の重量が大幅に増量したため、それを支える堅牢な架台である必要が出てきた。そのため、鉄板や鉄骨を用いた架台部分の補強工事を行った(図6参照)。また、サビ止め・架台保護のために、塗装を新たに塗りなおした。色は、太陽光による影響を受け

にくい白色とした。

この望遠鏡の駆動方式は赤道儀方式であり、天体の日周運動をひとつのギアで追尾できるという利点がある。しかし、この追尾を正確に実現するためには、架台の極軸が正しく天の北極を向いている必要がある。天の北極は、その土地の緯度に依るため、長野県と和歌山県の緯度の差に対応するズレが生じる。これを合わせるために、クレーン車で架台を吊り上げ、望遠鏡の足に下駄を履かせる作業を施した(図7参照)。



図7：クレーンで架台を持ち上げ、下駄を履かせる。工事は西村製作所。(2006年5月撮影)



図8：観測小屋の内部の様子。白い矢印が、天体導入装置。

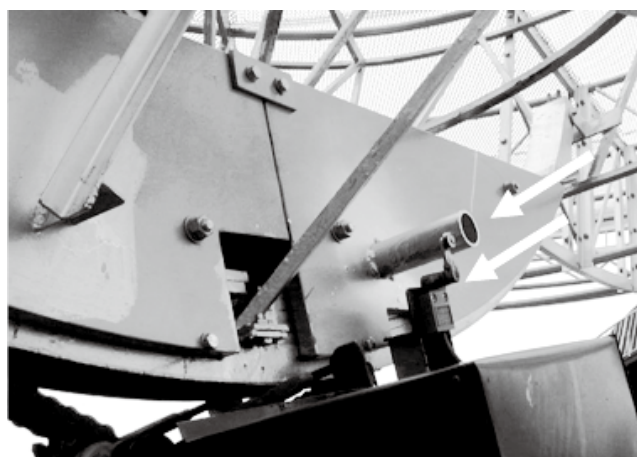


図9：赤緯のリミットスイッチ(下)とそのドッグ(上)。製作は下代組機工。(2006 年10 月撮影)

最終的な微調整は、ソフトウェア上で行う予定である。

この望遠鏡の以前の観測天体は太陽のみであった。そのため、天球の黄道付近のみが観測できれば十分であった。しかし、我々の観測ターゲットは天の川をはじめとする可能な限りの全天である。特に、天の川の

中でも銀河中心が存在するいて座近辺は、重要な観測領域であるが南中高度が低く、これを観測するためには望遠鏡を十分に低高度に向けられる必要がある。そのため、望遠鏡の可動領域を最大限に確保しつつ、安全に望遠鏡を駆動し、正確に天体を導入する天体導入

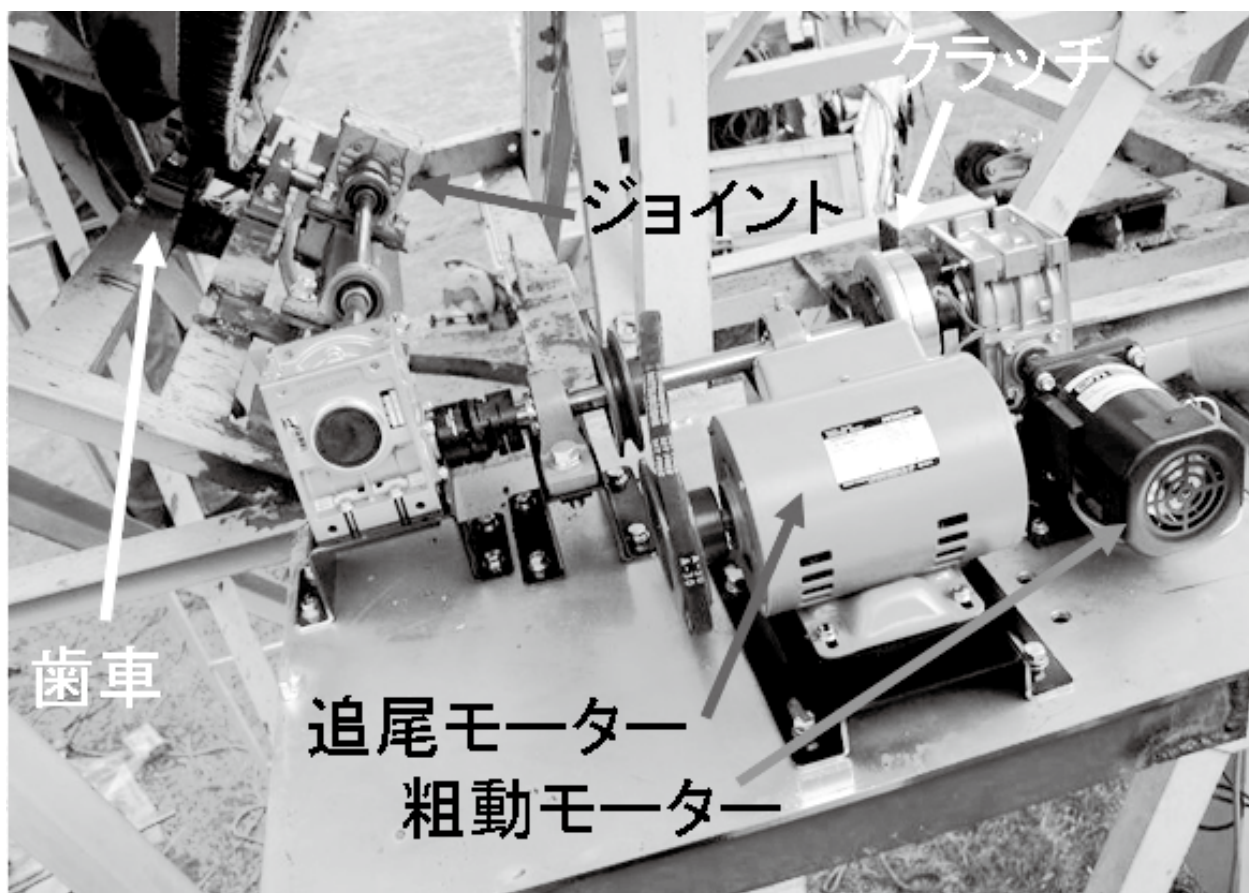


図10：新しくなった赤経駆動機構。



装置が必要となる。導入装置の製作は下代組機工に依頼した。望遠鏡の制御システムは、手持ちコントロールボックスとPC による制御の両方が可能である(図8 参照)。望遠鏡本体には、原点出しと可動限界検出のためのリミットスイッチが付いた(図9参照)。PC による制御により、赤道座標(赤経・赤緯)を指定することで望遠鏡を目的の方向へ向ける事が可能となった。(赤道座標系は、観測天体の位置を指定する際に用いる天球上の座標系。) これら赤経・赤緯の角度精度は、対応するエンコーダーの1 カウント分で0.125度である。また、追尾は元になった望遠鏡の名残で、太陽追尾に準拠するため、1 日に4 分程度の誤差を生じる。角度に直すと1 日に1度の追尾誤差に相当する。これは、この望遠鏡の空間分解能(約1.8度)と実際の観測時間(数分間程度)から、十分に無視できると考える。しかし、現在の指向・追尾の精度は機械精度で決まっており、今後天体観測により器差パラメータを取得し、補正を行う必要がある。

赤経駆動の機構については、特に老朽化が激しく、

2006 年12 月には突然の故障に見舞われたが、当時、既に新システムへの更新準備が進んでおり、事なきを得た。現在、駆動機構のデザインが一新され(図10参照)、望遠鏡駆動時の安全対策も増進している。旧システムで問題となった粗動時のパワー不足も解消され、架台の強化による影響と相まって、ギア送りの安定性が向上した。また、赤緯駆動系において、粗動のモーターの回転速度が早過ぎて、目的のエンコーダー値(赤緯に対応する)で停止し難いという問題が出ていたが、モーターの回転速度の遅いもの(赤緯駆動用ギヤードモーターG3LB-32-300-200)へと交換する事で対応した。

## 2.3 受信システムの開発

高周波化に伴い、1.4GHz 用の受信システムを新たに開発する必要がある。この望遠鏡のシステムの模式図を図11に示す。Feedホーン(図12参照)で受信した1.4GHzの電波信号を、望遠鏡の傍に設置された観測小屋へと引き込み、ダウンコンバータを用いて、より取り扱いの容易な20MHzへと周波数変換したのちに、サ

図11：新しい受信システムの模式図。

**給電部：**パラボラの焦点にfeedホーンを取り付けた。自由空間を伝播する電波を、ケーブルを伝わる電気信号へと変換する。

(図12参照)

**初段増幅器：**LNA(Low noise amplifier 低雑音増幅器)を焦点裏に取り付けた(図12の白い箱の内)。1.4GHzの信号を増幅する、Gain(利得)=40dB、NF(Noise figure 雑音指数)=0.2dB の高性能増幅器を使用。

**観測小屋へ：**低損失な高性能同軸ケーブルを用いて、信号を観測小屋内へと引き込んでいる。

**ダウンコンバータ：**解析・記録の難しい1.4GHzの信号を、解析のし易い20MHzのIF(Intermediate frequency 中間周波数)へと周波数変換する。周波数変換を行う際の基準信号として、内部ローカル発信器を持っている。

**サンプラー：**ダウンコンバータの出力である20MHzの信号をデジタル信号へと変換する。デジタル化するにあたり、信号の強度を量子化するステップ数は、1ビット・2ビット・4ビットから選べる。

**PC：**サンプラーが出力するデジタル信号を、USBケーブルを通して取得・記録を行う。

**スペクトル：**PCに記録したデジタル信号を、観測後にFFT(高速フーリエ変換)することにより、スペクトルを得る。

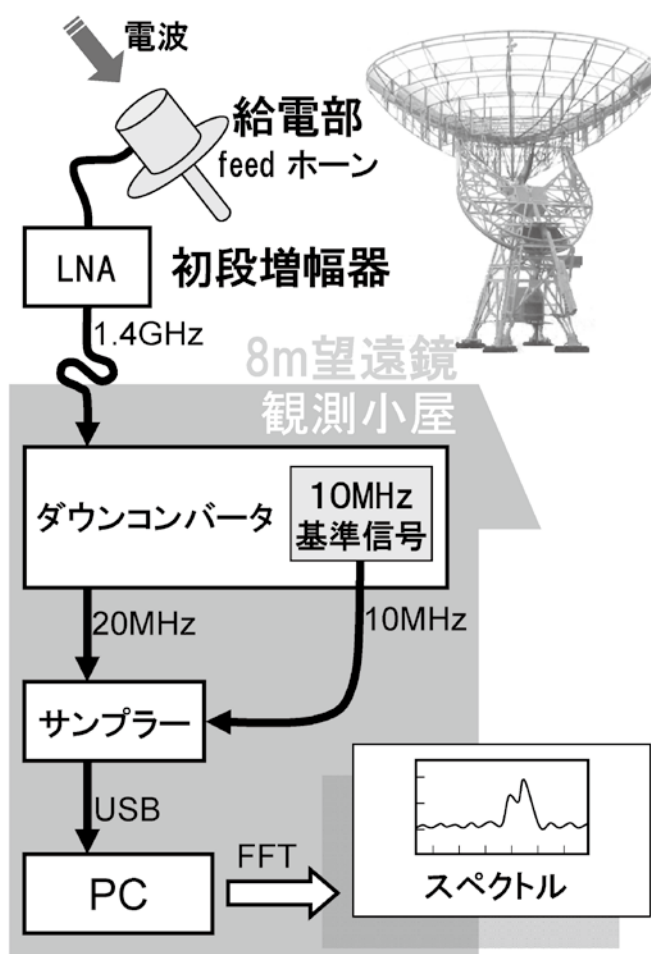




図12：パラボラ焦点に設置されたFeedホーン。空中を伝播する電波をケーブルを伝わる信号へと変換する役割を持つ。ホーンの背面には、LNAを収めた白い防水箱が見える。

ンプラーを用いてデジタルデータへ変換、PCに記録する。分光(FFT)などの解析も、PC上で行う。当初は過小評価していたアンテナー 低雑音アンプ(LNA)間のケーブル伝送損失が、実測により無視出来ない事が判明したため、ダウンコンバータから初段の低雑音アンプを取り出し、利得40dB、NF(雑音指数)0.2dBの低雑音アンプを焦点裏に設置することでシステム雑音を軽減した。この低雑音アンプの製作は、川越無線に依頼した。また、観測小屋へと信号を引き込むケーブルにおいても、その損失が受信システムの性能に影響するため、損失を可能な限り少なくすべく、低損失な高周波同軸ケーブル(12D-SFA)を用いた。また、ダウンコンバータは、内部ローカル発信器により、ローカル周波数(1400MHz)および10MHz基準周波数を生成しており、後段のサンプラーに10MHz基準信号を供給している。

取得したデータの記録と解析のために、日本通信機社製のサンプラー K5/VSSP32 9270を使用した。データ取得のため、Debian GNU/Linux3.1(sarge)で動くデスクトップPCを用意した(Kernel 2.6.8)。サンプラーは、USB2.0インターフェースを用いてPCに接続しており、最大256 Mbpsのデータ転送が可能である。PCに記録されたデータは、FFT(高速フーリエ変換)を用いてスペクトルデータへと変換される。我々の観測システムは、IF周波数20 MHzなので、サンプリング周波数は64 MHzを用いる。量子化ビット数は、1ビット幅を使用した。観測ソフトは、当面、情報通信研究機構・鹿島VLBIグループが開発した、インターネット



図13：給電部の工作風景。みさと天文台にて。

トVLBI 観測ソフトウェアを使用している。

和歌山大学の学生自主創造科学センター(クリエ)において、望遠鏡焦点に取り付ける低雑音アンプの取り付けや防水処理等を行った。また、落雷対策として、ダウンコンバータ直前に同軸避雷器を挿入した。また、観測小屋でのアースの必要性から、アース棒の埋設も行った。

### 3. 試験観測

#### 3.1 HI輝線のファーストライト

2006年9月1日、改修を終えた8m電波望遠鏡を用いて試験観測を行った。天の川の中に位置する、いて座、たて座、はくちょう座、の3点へ望遠鏡を向けて、サンプラーの代わりにスペクトルアナライザを用いて分光と記録を行った。結果、3点からそれぞれ異なるプロファイルを持つスペクトルデータが得られた。これが8m望遠鏡での1.4GHzのファーストライトとなる。

#### 3.2 銀河面の観測

2007年3月23日と4月15日に、サンプラーを用いて、銀河赤道面に沿っての観測を行った。

我々の住む銀河系は、ドラ焼きのような平べったい円盤状に星が分布していると考えられている。この円盤内に存在する太陽系から円盤を観察すると、星は天球をとりまく帯状に見える。これが、夜空に見られる天の川である。一方、星の原材料であり残骸でもある中性水素(HI)も、星と同様に銀河系に多量に含まれている。そこで、オールトはHIの分布を調べることでより銀河系の姿を明らかに出来ると考えた。彼は、銀河



の赤道付近のHI分布を詳細に観測する事により、銀河の2次元地図(参考文献[1]、図14参照)を作成する事に成功した。

今回の我々の試験観測では、銀緯0度の銀河赤道面に沿って、(みさと天文台から観測可能な)銀経0度から250度までを10度間隔に観測した。銀河座標(銀経・銀緯)とは、銀河系の円盤を赤道面と定義した天球上の座標系であり、銀緯0度は銀河中心方向を指す。観測は、ポジションスイッチ法を用い、OFF点は銀緯90度の点とした。ON点・OFF点共に観測時間を各点30

↓図14：オールの描いた銀河系の2次元地図

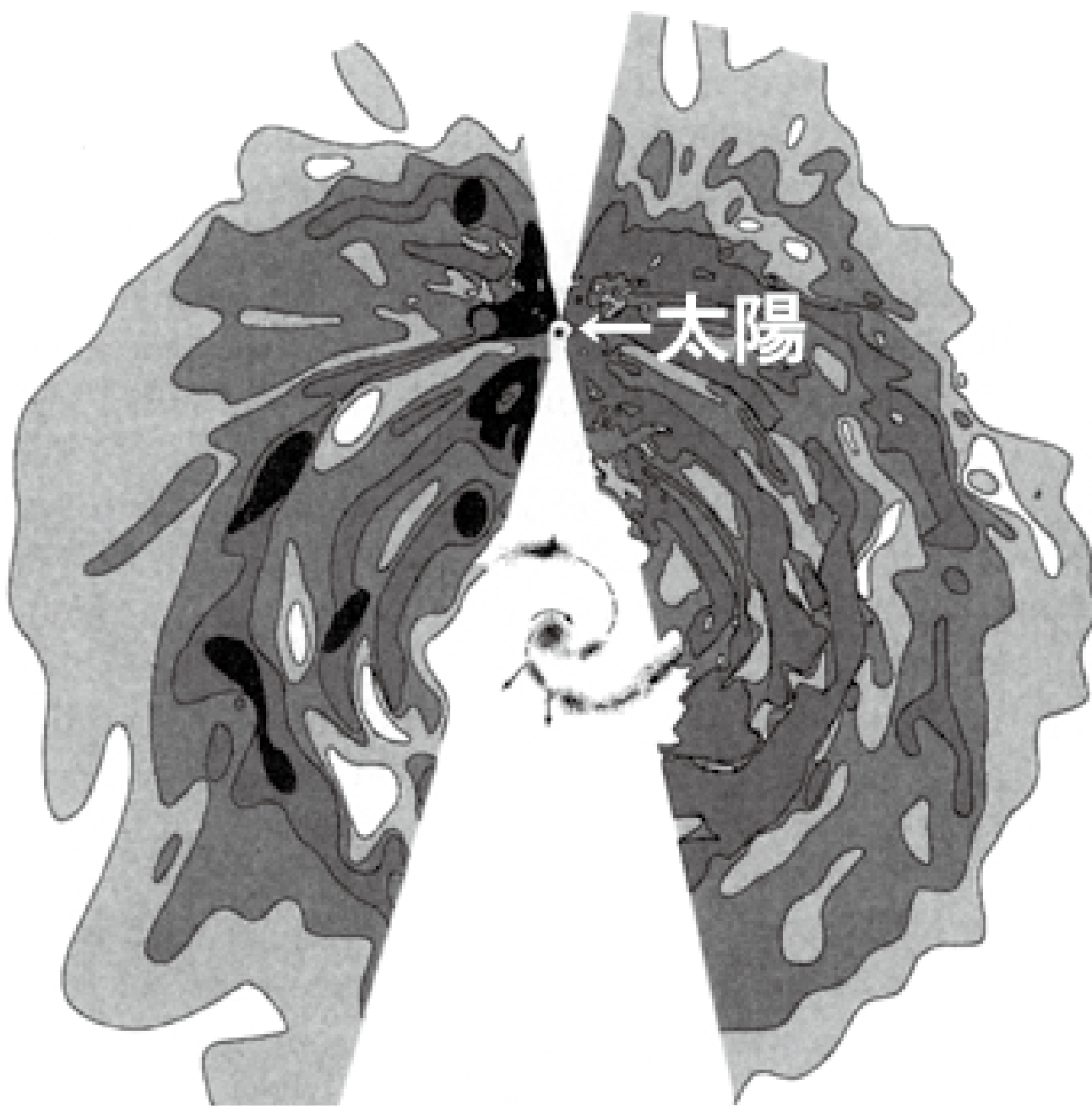
(参考文献[1]より)

我々の住む銀河系を真上から見たイメージ。

白い矢印が太陽系の位置を表す。灰色が濃いほど沢山のHIガスが分布し、薄い場所ほどHIガスが少ない事を表す。

これは、銀河系の姿を観測的に描いた初めての研究結果であり、この結果から、我々の銀河系が渦巻き腕をもつ事が分かった。

太陽の上下に伸びる、放射状の大きな白い三角形・逆三角形は、データの欠損を表す。



秒とした。得られた結果を図15に示す。図のスペクトルの縦軸は、電波の強度に対応し、電波吸収体を用いたR-sky 法 (chopper wheel method (参考文献 [3]))によって較正した温度( $T_{a*}$ )で表している。アンテナの開口能率は未測定のため考慮されていない。強度較正のためのYファクターの測定は、パワーメータを用いて行った。受信システムの性能を表すシステム雑音温度は170K を用いた。横軸は、観測した周波数を、ドップラーシフトにより、後退速度 (LSR速度)へ変換したものである。HI 輝線の静止周波数は1.42046GHz を用いた。この1 チャンネル幅は、後退速度 $3.3 \text{ km s}^{-1}$  に対応する。図15は、天球上の各点から得られたスペクトルを、等間隔にオフセットさせる事により、ひとつのグラフに書き込んでいる。

図15を見ると、銀河系の中心方向に対応する銀経0 度のスペクトルは、高いピークと細い線幅を持つ。これは、ドップラーシフトによる速度検出は視線速度成分のみに限られており、銀河中心を見る方向においては、銀河回転の運動は視線方向と垂直になるため、すべての放射が同じ周波数に重なり、線幅が細くなる。次に、銀経10度、20度、……と、銀河赤道に沿った観測点のスペクトルを見てゆくと、次第に銀河の回転運動がみえてくる。例えば、スペクトルに3つのピークが現れた時は、観測方向に速度の異なる3つのHIガスの塊が存在する事を表している。小さな銀緯のデータは、銀河中心付近を見通すため、大きく異なる速度成分が一度に観測され、線幅が広がる。観測点の銀経が大きくなるにつれ、連続的に速度変化がおこり、徐々に線幅が小さくなる。そして、銀経180度でふたたび、銀河回転が視線方向と垂直になり、細いスペクトルが現れる。銀経180度を過ぎると、再び線幅が広くなり、銀河回転運動による速度成分が見え始める。(詳細は、添付A 参照)

→図15：銀河面に沿って得られた10度ごとのHIのスペクトル。縦軸は電波強度に対応するアンテナ温度( $T_{a*}$ [K])で、能率の補正はしていない。一番上が銀経0度の銀河中心で、一番下は銀経250度に対応し、それぞれのスペクトルは、35Kずつオフセットさせている。横軸は観測周波数に対応した後退速度( $V_{\text{LSR}}$ [ $\text{km s}^{-1}$ ])で、表している。

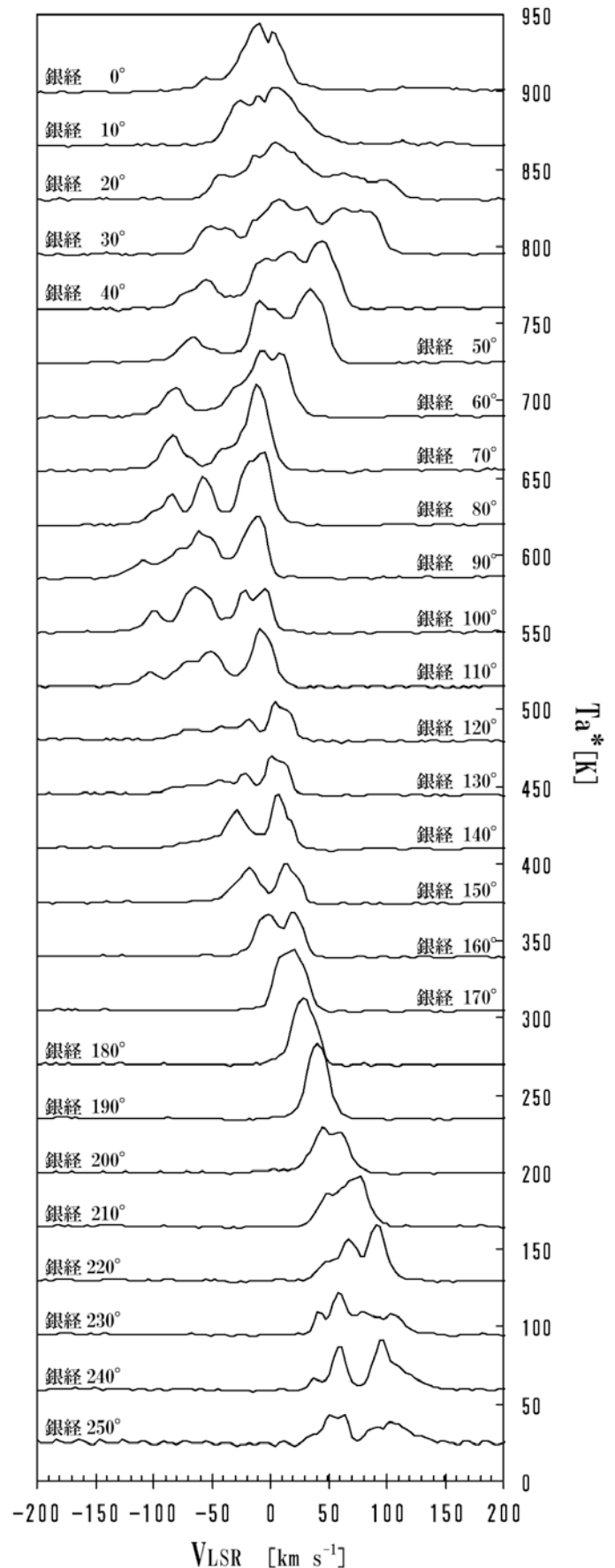






図16：2006年12月のクリスマスイベント。（みさと天文台にて。）

#### 4. 天文教育活動

この8m 望遠鏡を用いた教育実践について、簡単に紹介する。まず、和歌山大学の生涯学習教育研究センターでは、毎月一般市民を対象とした「土曜講座」という市民講座が開催されている。2006年10月7日、この講座の枠組みを利用して、「電波で見る宇宙」と題し、佐藤が電波天文学と8m 電波望遠鏡の紹介をした。受講者は、高校生から80代まで約90人で、約2時間の講演形式での講座である。また、みさと天文台において、2006年12月23日のクリスマスイベントとして、「電波で夏の天の川を観てみよう」と題した天文教室を開催した(図16参照)。この天文教室でも佐藤が講師をつとめ、実際に8m 電波望遠鏡を駆動しリアルタイムでデータの取得を行う観測実演をした。

8m 望遠鏡の立ち上げ目的のひとつとして、その装置開発のノウハウを蓄積し、それを生かして高校や科学館向けの安価な小口径の電波望遠鏡セットの開発をする、というものがある。これを受けて、現在、口径2mの電波望遠鏡が製作されている。この望遠鏡の製作は、和歌山大学のクリエのプロジェクトのひとつと

して、大学生の手によって行われている(図17参照)。安価を謳うために、2m 望遠鏡のパラボラ部分はアルミ材を手で曲げて作った。駆動部はアマチュア無線で使われるローテーターを用いた。受信機もアマチュア無線で使われる量産品で代替できないかと、現在模索中である。この望遠鏡は8m 望遠鏡の受信機システム



図17：クリエで2mパラボラを手作りする学生



などの試験にも活用されている（図18参照）。

また、和歌山大学紀南講座の枠組みを用いて、2006年12月16日、この2m 電波望遠鏡を和歌山県立新宮高校に持ち込み、実際に高校生を対象とした電波天文学の授業を行った(参考文献[4]、図19参照)。講師は尾久土がつとめた。偶然にも、この高校は日本に電波天文を広めた畑中武夫の母校でもある。

## 5. まとめ

みさと天文台の8m 電波望遠鏡をHI観測望遠鏡とするため、さまざまな改修工事を進めている。パラボラ、架台、受信機などの改修が順調に進んでおり、試験観測において銀河面からのHI輝線をとらえる事に成功した。本研究は、継続してオンリーワン創成プロジェクト(H19-20)の補助を受けており、今後は、さらなる注意深い調整や試験を行い、望遠鏡の観測性能の確立を図る。

この望遠鏡の定常的な運用が開始すれば、以下に述べる成果が期待できる。

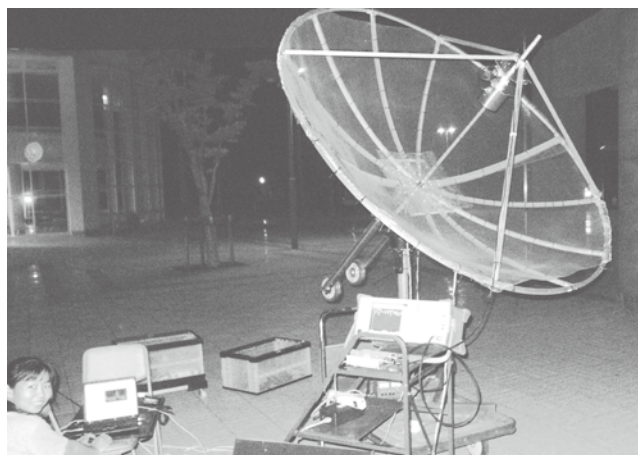


図18：2m 電波望遠鏡を用いた試験観測の風景。(和歌山大学にて)

(1)学校教育の教材の提供ができる。はじめに述べたように、電波天文学の学習教材は稀であり、この8m 電波望遠鏡やその観測データを用いた、新たな教材の開発が可能である。具体的には、第一に、銀河系の2次元地図を描いたオールトの研究の追体験が出来る教



図19：2006年12月の紀南講座の様子（新宮高校にて）



材を作成する。また、学校や科学館が購入できるような安価な電波望遠鏡セットの開発も目指す。2m 電波望遠鏡は、このセットの試作機でもある。

(2) 学校だけではなく、一般を対象とした電波技術や天文学の一般普及活動。この望遠鏡は、一般市民の訪れる公開天文台に設置されているため、来台者を対象とする電波天文学の普及を目指したイベントや展示開発ができる。具体的には、クリスマスイベントでの観測実演などの試みがはじまっている。

(3) 卒論・修論研究の素材としての活用。8m 電波望遠鏡は、和歌山大学の占有望遠鏡であることから、長時間観測が必要な萌芽的研究に利用可能である。国内で唯一のHIをメインターゲットとする電波望遠鏡として、和歌山大学教育学部富田研の学部生・院生の研究素材として活用したい。

本研究の以上の結果は、以下の研究会(査読無し)において成果を報告をした。

- ・日本天文学会2006年春季年会：「野辺山動スペクトル計の21cm(HI)用望遠鏡としての再生」(佐藤 他)
- ・日本天文学会2006年秋季年会：「野辺山動スペクトル計の21cm(HI)用望遠鏡としての再生 II」(佐藤 他)
- ・第49回 人工知能学会先進的学習科学と工学研究会：「みさと天文台 8 m電波望遠鏡を用いた銀河系からのHI輝線観測」(佐藤 他)
- ・日本天文学会2007年春季年会：「野辺山動スペクトル計のHI望遠鏡への改修とその初期成果」(佐藤 他)
- ・日本天文学会2007年春季年会：「学生による 2 m電波望遠鏡の製作と高校での教育実践」(尾久土 他)

また、以下の学術雑誌(査読有り)に投稿中である。

- ・地学教育：「中性水素電波輝線(HI)用の小型電波望遠鏡の製作と高校での天の川の観測実習」(尾久土 他)(参考文献[4])
- ・天文台報：「みさと天文台 8 m電波望遠鏡用銀河面HI輝線観測装置の開発」(佐藤 他)(参考文献[5])

## 謝辞

本研究は、和歌山大学のオンリーワン創成プロジェクト経費(平成17 - 18 年度、尾久土 他)、国立天文台大学支援経費(平成17 年度、富田 他)、科学研究費補助金 基盤C(平成17 - 18 年度、石塚 他)、和歌山大学教育研究資金(平成18 年度、尾久

土 他)、国立天文台受託研究費(平成18 年度、佐藤 他)の補助を受けて行われた。

また、望遠鏡改修にあたり、パラボラの改修工事に携わった西村製作所ならびに西浦機工、高性能LNAを特注で製作していただいた川越無線、ダウンコンバータ並びにサンプラーの製作・サポートでお世話になった日本通信機、観測ソフトを配布いただいたNICTの鹿島VLBIグループ、以上の関係者各位に感謝の意を表したい。また、望遠鏡の竣工式にご出席頂いた和歌山大学小田学長ならびに紀美野町岩橋教育長と、クリスマスイベントでの招待講演をご快諾頂いた森本東大名誉教授にも、8m 望遠鏡を大いに盛り立てて頂いた事に、感謝の意を表したい。

## 参考文献

- [1] J. H. Oort, F. J. Kerr, and G. Westerhout: The galactic system as a spiral nebula, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **118**, 379 - 389 (1958).
- [2] K. Kai, M. Sawa, Y. Shiomi, S. Aiba, H. Sekiguchi, N. Shibuya, T. Kosugi and, H. Nakajima: Nobeyama Radiospectrographs for Solar Observations, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **32**, 371 - 376 (1980).
- [3] M. L. Kutner and, B. L. Ulich: Recommendations for calibration of millimeter-wavelength spectral line data, *Astrophysical Journal*, **250**, 341 - 348 (1981).
- [4] 尾久土正己, 佐藤奈穂子, 藤沢健太, 富田晃彦, 石塚互, 佐藤敏行, 塩川貴之, 近多健輔, 雪谷俊之, 半田利弘: 中性水素電波輝線(HI)用の小型電波望遠鏡の製作と高校での天の川の観測実習, *地学教育*, 投稿中.
- [5] 佐藤奈穂子, 尾久土正己, 富田晃彦, 石塚互, 曾我真人, 矢動丸泰, 豊増伸治, 小澤友彦, 佐藤文隆, 下代博之, 市川雄一, 矢治健太郎, 半田利弘, 戎崎俊一, 藤沢健太, 祖父江義明, 中西裕之, 阪本成一, 縣秀彦: みさと天文台 8 m電波望遠鏡用銀河面HI輝線観測装置の開発, *天文台報*, 投稿中.
- [6] H. Nakanishi and Y. Sofue: Three-Dimensional Distribution of the ISM in the Milky Way Galaxy: I. The H I Disk, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **55**, 191- 202 (2003)

## 添付A

### 電波天文学とHI輝線

電波天文学は 1931 年にジャンスキー (K. G. Jansky) がメートル波の太陽系外 (天の川) 電波を発見したのが始まりである。銀河系内にある星間物質は、電離した水素 (HII エイチツー)があれば、その発する強い可視光の輝線スペクトルによって観測が可能であるが、電離していない水素原子 (HI)は、観測できないと考えられていた。しかし、HII は可視光のため、星間物質の吸収の影響を受けやすく、天の川の方角には遠くまで観測することができない。ところが、1944 年、ファン・デ・フルスト (H. C. van de Hulst) は、水素の電子のスピンの方向が遷移することで、水素原子から波長 21cm の電波輝線が放射されることを理論的に発見した。もし、この電波が観測できれば、星間吸収の影響をほとんど受けずに、銀河系の奥深くまで観測することが可能になると考えられた。1951 年、ハーバード、ライデン、シドニーなど多くの天文台でほぼ同時に、銀河系からの 21cm 輝線の観測に成功した。これ以降、銀河を観測する標準の道具として、波長 21cm の電波望遠鏡が活躍している。

### HI輝線と回転曲線

HI (中性水素) の出す 21cm 輝線は、レーザー光線のように決まった周波数で放射される。しかし、放射をする水素原子が観測者に対して運動をしていると、その運動の速度に応じて観測される周波数が微妙に変化する (ドップラー効果)。電波の観測機器は高い周波数分解能を持つので、水素分子の詳しい運動の様子を調べることができる。まず、このHIの観測により、我々の銀河系の回転曲線を測定できる。回転曲線とは、横軸に銀河中心からの半径をとり、縦軸に各半径に対応する回転速度をプロットした曲線である。(図A1参照)。我々の銀河は、ドラ焼きに似た、平べったい楕円体をしており、その中の星やHIガスは、この回転曲線に沿って回転運動をしている。この回転曲線は、我々の銀河系における質量の分布と密接に関係している。

### 銀河系の2次元地図

銀河系の物質が一様に、上記の回転曲線に従って純粋な円運動をしていると仮定すると、銀河系内のHI分布図を描くことができる。円盤上の各点の、地球に対

する相対速度 (図A-2) を用いると、観測されたスペクトルの速度情報を円盤上の位置情報へと焼き直す事ができる。(但し、地球半径よりも小さい半径では、解が一意に決まらないため、他の要素による解析が必要となる。) 観測されるHI輝線の強度が強い場所は、水素原子が多く存在し、銀河系の渦巻腕に対応すると考えられる。これによりオールトは、はじめて観測的データから、真横からしか観測できない我々の銀河の真上から見た2次元地図を描くことができた。この結果、我々の銀河系は、渦巻き腕が存在する、渦巻銀河であることがわかった。現在は、さらなる詳細な観測・解析が進んでおり、図A-3 のような銀河系の姿が描かれている。

### 日本のHI観測望遠鏡

欧米では多くの電波望遠鏡が HI 観測で活躍している。一方わが国では、より波長の短い電波での観測で特徴を出し、本格的な HI 観測は行われてこなかった。本望遠鏡の完成により、国内での継続的な HI 観測が可能になる。さらに、HI 観測が銀河の渦巻き構造を明らかにしたという歴史的観測を大学生や高校生が追体験することなどで、天文教育に新しい生きた教材を提供することができると考える。

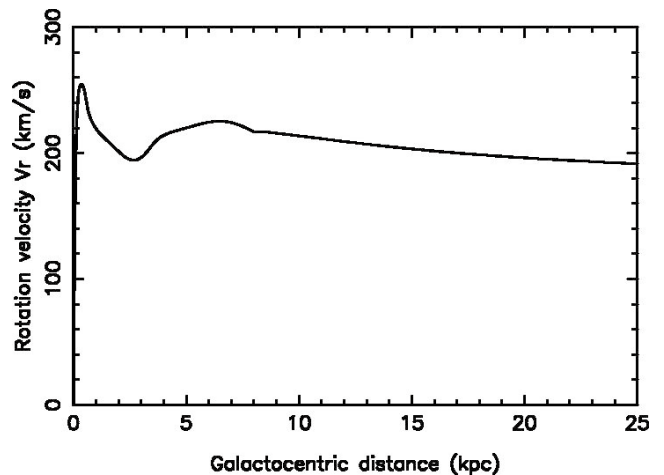


図 A-1: 我々の銀河系の回転曲線。

横軸が銀河中心からの半径を表し、縦軸が各半径における回転速度を表す。半径が大きくなっても、回転速度が一定値を保つ特徴を示す (微分回転)。これは、銀河に含まれる物質が広範囲に広がって分布している事を表している。(参考文献[6]より)



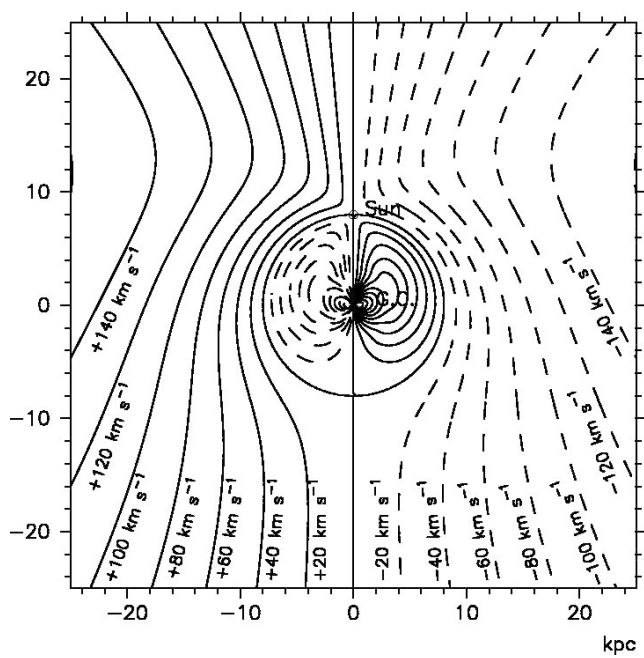


図 A-2：地球から観測される銀河系各点における相対速度の地図。(参考文献[6]参照)

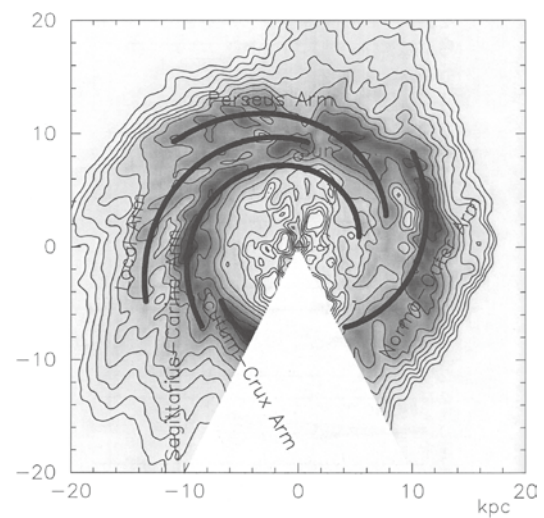


図 A-3：最新の研究で明らかになっている銀河系のHI 分布図。(H. Nakanishi: Observational Study in Atomic and Molecular Gas Disks of Milky Way Galaxy and Nearby Cluster Galaxy, The University of Tokyo, doctor thesis (2005) 参照)